

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Peneliti sebelumnya telah melakukan penelitian mengenai pengaruh tekanan kompaksi terhadap karakteristik komposit matriks Aluminium yang diperkuat Titanium hasil metalurgi serbuk. Penelitian tersebut dilakukan menggunakan komposisi campuran aluminium (90%) dan titanium (10%). Kemudian campuran bahan tersebut dikompaksi dengan variasi tekanan sebesar 159.2, 191.1, 222.9, 254.8 dan 286.6 MPa. Setelah itu, sampel di sinter pada temperature 500°C selama 90 menit. Sampel yang telah dibuat kemudian di uji kekerasan menggunakan metode *Rockwell Hardness Test* selanjutnya dilakukan pengamatan mikrostruktur, densitas, serta porositasnya menggunakan mikroskop elektron (SEM) (Alfa, 2018).

Dari penelitian tersebut menunjukkan hasil bahwa semakin tinggi tekanan kompaksi maka densitasnya juga akan semakin tinggi, sedangkan untuk porositasnya akan semakin rendah.

Kemudian pada penelitian yang telah dilakukan oleh Izza (2017) dengan judul “Intermetallic Bonding Al-Ti dengan variasi persen volume Ti menggunakan proses sintering dan kompaksi” bertujuan untuk mengetahui kekerasan dengan pengujian *Rockwell Hardnes Test* dan pengamatan struktur mikronya menggunakan mikroskop electron (SEM). Penelitian tersebut dilakukan dengan komposisi 0%, 5%, 10%, 15% dan 20% titanium dan sisanya aluminium dengan ukuran 100 mesh, kemudian kedua

bahan tersebut diberi tekanan kompaksi dengan beban 100 kN. Setelah itu, sampel di sinter selama 90 menit dengan temperatur 500°C. Hasil pengujian terhadap sampel tersebut menunjukkan bahwa pada penambahan tinggi persen komposisi titanium didapatkan nilai kekerasan logam Al-Ti yang mengalami peningkatan. Maka, semakin tinggi persen komposisi titanium dapat menyebabkan peningkatan sebaran serbuk titanium pada campuran aluminium dan juga menurunkan porositasnya.

Prasetyo (2004) telah melakukan penelitian mengenai karakteristik aluminium hasil dari proses metalurgi serbuk. Bahan dasar serbuk dihasilkan dari pengikiran batang aluminium, kemudian serbuk tersebut dipadatkan dan dikompaksi dengan tekanan 0,17 kN/mm². Setelah itu, spesimen di sintering dengan variasi temperatur 300°C, 400°C, dan 500°C dengan waktu sinter 60 menit dan 80 menit. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa pada sentering dengan temperatur 300°C dan 400°C tidak berhasil dikarenakan benda uji terlalu rapuh. Akan tetapi pada temperatur sinter 500°C dalam waktu sinter 60 menit dihasilkan kekerasan Vickers benda sebesar 10,5 (VHN) sedangkan pada temperatur yang sama dengan waktu sinter 80 menit dihasilkan kekerasan benda sebesar 12,3 (VHN).

Fitria dan Waziz di dalam Rusianto (2004) juga telah melakukan penelitian mengenai karakteristik aluminium hasil dari proses metalurgi serbuk. Bahan dasar serbuk dihasilkan dari pengikiran batang Al-9% dan Si, kemudian serbuk tersebut dipadatkan dan dikompaksi dengan variasi tekanan kompaksi 300, 400, dan 500 MPa. Setelah itu spesimen disinterring dengan variasi temperature sinter 450, 500, dan 550°C dengan waktu sinter 120 menit. Setelah dilakukan pengujian terhadap spesimen

tersebut menunjukkan bahwa semakin meningkat tekanan kompaksi dan temperatur sinter akan meningkatkan densitas dari specimen tersebut.

2.2 Material komposit

Komposit merupakan material yang tersusun dari dua atau lebih bahan yang memiliki fasa yang berbeda kemudian menjadi suatu material baru dengan sifat yang berbeda dan lebih baik dari bahan-bahan penyusunnya. Kemudian definisi lain menyatakan bahwa komposit adalah perpaduan dari bahan yang dipilih berdasarkan sifat dari masing-masing bahan penyusun untuk menghasilkan material baru dengan sifat yang unik dibandingkan sifat material dasar sebelum dicampur dan terjadi ikatan permukaan pada masing-masing material penyusun (Ajiriyanto, 2010).

Material komposit tersusun atas 2 bagian yang berbeda, yaitu matriks yang merupakan fasa utama dan berfungsi sebagai pengikat dan pendistribusi beban ke penguat, dan yang kedua adalah penguat (*reinforcement*) yang merupakan fasa kedua yang memiliki fungsi untuk meningkatkan sifat-sifat mekanik pada material komposit.

Menurut Sari (2015), secara garis besar terdapat 3 macam komposit berdasarkan jenis penguat yang digunakannya, yaitu:

1. *Fibrous Composites* (Komposit Serat) adalah jenis komposit yang tersusun dari sebuah lapisan yang menggunakan serat atau *fiber* sebagai penguatnya. *Fiber* yang biasa digunakan bisa berupa *carbon fibers*, *glass fibers*, *aramid fibers* (*poly*

aramide) dan lain sebagainya. *Fiber* ini biasanya disusun sejajar dengan orientasi tertentu dan terkadang juga dengan bentuk seperti anyaman.

2. *Laminated Composites* (Komposit Laminat) merupakan jenis komposit yang terdiri dari dua atau lebih lapisan yang digabung menjadi satu dan setiap lapisnya memiliki karakteristik atau sifat tersendiri.
3. *Particulate Composites* (Komposit Partikel) merupakan jenis komposit yang menggunakan partikel atau serbuk sebagai penguatnya dan terdistribusi secara merata dalam matriksnya.

Sedangkan berdasarkan matriksnya, komposit dapat dibedakan menjadi 3 macam, yaitu:

1. *Metal Matrix Composites* (MMCs), yaitu komposit yang memiliki matriks berupa logam.
2. *Ceramic Matrix Composites* (CMCs), yaitu komposit dengan matriks dari bahan keramik.
3. *Polymer Matrix Composites* (PMCs), yaitu jenis komposit dengan matriks dari bahan polimer.

Pada penelitian kali ini, jenis komposit yang akan digunakan adalah komposit matriks logam dengan penguat partikel atau serbuk. *Metal Matrix Composites* (MMCs) merupakan material yang terdiri dari matriks berbahan logam. Sifat komposit tergantung dari beberapa faktor yang mempengaruhinya, diantaranya adalah jenis material penyusun komposit yang digunakan, fraksi penguat, dimensi

serta bentuk penguat serta beberapa variable proses lainnya. Bahan matriks yang digunakan umumnya adalah aluminium dan paduannya, magnesium dan paduannya serta logam lain sesuai dengan kebutuhan.

Salah satu jenis komposit matriks logam yang banyak dikembangkan di industri otomotif saat ini adalah komposit yang matriksnya berupa logam (MMC atau *Metal Matrix Composite*) yaitu komposit bermatriks aluminium (AMC atau *Aluminium Matrix Composite*). Matriks yang digunakan dalam AMC dapat berupa Al seperti Al-Si, Al-Cu, Al seri 1xxx, 2xxx, dan jenis lainnya. Penggunaan bahan aluminium dan atau paduannya sebagai matriks karena bahan tersebut memiliki sifat yang sangat menarik yaitu nilai densitas yang rendah, memiliki kemampuan untuk dikuatkan dengan pengendapan presipitat, ketahanan terhadap korosi sangat baik, konduktifitas panas yang baik serta listrik tinggi. AMC juga dapat menghasilkan karakteristik mekanik yang bervariasi tergantung dari jenis paduannya. Pada *metal matrix composite*, umumnya menggunakan penguat berbentuk partikel atau serbuk (Ajiriyanto, 2010).

Pada struktur komposit, bahan penguat yang tersusun dari bahan berbentuk partikel atau serbuk disebut bahan komposit partikel (*particulate composite*). Bahan komposit partikel tersebut umumnya digunakan sebagai penguat bahan komposit matriks keramik (*metal matrix composite*).

Keuntungan dari komposit yang disusun oleh penguat berbentuk partikel adalah kekuatannya lebih seragam pada berbagai arah dan dapat digunakan untuk

meningkatkan kekuatan serta meningkatkan kekerasan material. Proses produksi pada komposit yang disusun oleh penguat berbentuk partikel dilakukan dengan metode metalurgi serbuk.

2.3 Metalurgi Serbuk

Metalurgi serbuk merupakan sebuah proses pembentukan produk dari serbuk material dengan cara penekanan yang diikuti dengan proses perlakuan panas untuk memperoleh kepadatan sesuai dengan yang diinginkan. Serbuk dapat berfungsi sebagai bahan utama dari produk atau sebagai bahan pengikat sehingga dalam prosesnya, serbuk dapat dibuat dari campuran dua jenis bahan serbuk atau lebih. Bahan serbuk dapat berupa logam, keramik maupun polimer tergantung pada karakteristik produk yang akan dibuat (Callister, 1994).

Serbuk adalah partikel yang berukuran lebih kecil dari 1 mm. Kebanyakan serbuk yang digunakan dalam metalurgi serbuk adalah serbuk logam, meskipun kadang sering dikombinasikan dengan fasa lain seperti keramik dan polimer. Pengembangan teknologi pembuatan produk dengan menggunakan serbuk merupakan suatu langkah yang tepat untuk menghasilkan produk dengan bentuk yang memiliki kualitas atau tingkat ketelitian yang bagus dan lebih ekonomis (Callister, 1994).

Secara umum, langkah-langkah pada proses pembuatan komponen dengan metode metalurgi serbuk adalah sebagai berikut:

1. Pencampuran serbuk (*mixing*)
2. Kompaksi (pemadatan)

3. *Sintering*

4. *Finishing*

2.3.1 Pencampuran Serbuk (*mixing*)

Pencampuran serbuk (*mixing*) dapat dilakukan dengan cara mencampurkan logam yang berbeda dengan material-material lain untuk memberikan sifat fisik dan mekanik yang lebih baik. Pencampuran tersebut dapat dilakukan dengan proses kering (*dry mixing*) dan proses basah (*wet mixing*). Pelumas (*lubricant*) mungkin ditambahkan untuk meningkatkan sifat *powder flow*. Kemudian binders ditambahkan untuk meningkatkan *green strengtnya* seperti wax atau polimer termoplastik (Zanna, 2017).

Pencampuran (*mixing*) merupakan perlakuan yang diberikan terhadap serbuk dari beberapa jenis komposisi material yang berbeda untuk mendapatkan hasil campuran baru yang merata. Selama proses pencampuran, mungkin dapat terjadi kontaminasi dan kemungkinan lainnya terhadap campuran yang merugikan hasil produk maupun proses selanjutnya. Proses pencampuran serbuk dapat dilakukan dalam kondisi kering (*dry mixing*) maupun dalam kondisi basah (*wet mixing*) (Widyastuti, 2009).

Menurut Effendi (2008), dalam proses pencampuran serbuk, terkadang ditambahkan pelumas (*lubricant*) yang bertujuan untuk mengurangi friksi yang terjadi selama proses kompaksi. Selain itu, pelumas biasanya juga dioleskan pada permukaan dinding cetakan. Friksi dapat terjadi antara sesama komponen cetakan,

cetakan dengan serbuk serta antar sesama serbuk campuran. Kemampuan gaya gesek partikel serbuk yang besar pada saat proses kompaksi akan mengurangi mampu alir partikel. Selain itu, gaya gesek antar partikel dengan dinding juga akan mempersulit mampu tekan serbuk. Oleh karena itu, diperlukan pelumas yang jenis bahannya disesuaikan dengan bahan material serbuk yang digunakan dan juga harus memperhatikan sifat material pelumas itu sendiri. Sehingga, bahan pelumas (*lubricant*) dipilih dari bahan yang tidak reaktif terhadap campuran serbuk serta memiliki temperature titik leleh yang rendah, sehingga pada saat proses sinter ditingkat awal, *lubricant* sudah dapat menguap. Untuk paduan yang berbasis logam, pelumas yang umum digunakan adalah Mg dan Zn stearat. Komposisi pelumas yang digunakan berkisar 1-2% wt. Bila digunakan secara berlebihan maka akan mengurangi nilai densitas dan kekuatan dari bahan kompak mentah (*green compact*).

2.3.2 Kompaksi

Proses kompaksi merupakan suatu proses pembentukan logam dari bentuk serbuk dengan cara memberikan penekanan pada serbuk logam yang telah dimasukkan ke dalam cetakan (*die*). Proses kompaksi biasanya dilakukan dengan cara memberi tekanan dari satu arah ataupun dua arah. Pada penekanan satu arah, penekanan dari atas bergerak ke bawah. Sedangkan pada penekanan dua arah, penekanan dari atas dan penekanan dari bawah saling menekan secara bersamaan dari arah yang berlawanan. Proses kompaksi juga dapat dilakukan pada kondisi panas (*hot compaction*) maupun pada kondisi suhu ruang (*cold compaction*). Material yang

dihasilkan dari metode metalurgi serbuk juga ditentukan oleh proses kompaksi dalam membentuk produk dengan kekuatan yang baik (Rusianto, 2009).

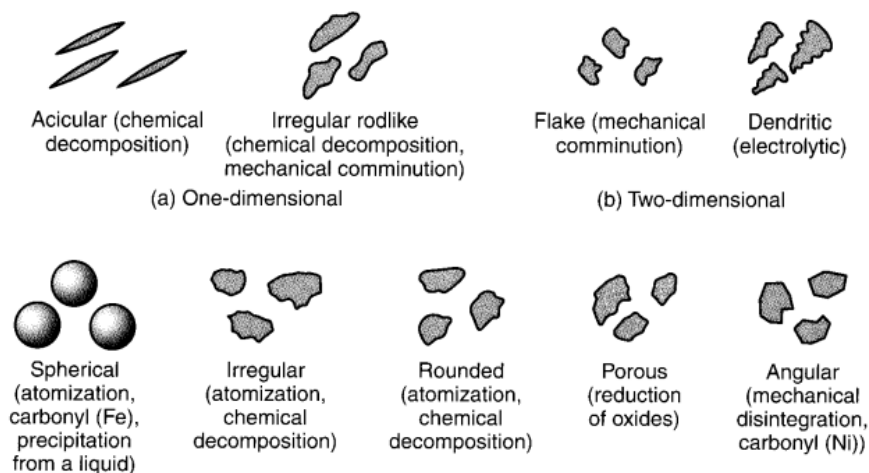
Bahan dengan kekerasan yang rendah, seperti aluminium, kuningan, dan perunggu memerlukan tekanan pemadatan yang rendah pula. Sedangkan bahan-bahan dengan tingkat kekerasan yang tinggi seperti besi, baja dan nikel paduan memerlukan tekanan pemadatan yang tinggi pula (Suwanda, 2006). Mengacu pada ASM Handbook vol. 7 tentang "*Powder Metallurgy Methods*", tekanan kompaksi yang dapat digunakan pada aluminium dan paduan aluminium adalah sebesar 100-400 MPa.

Penekanan atau kompaksi pada serbuk dilakukan dengan tujuan agar serbuk dapat menempel antara satu dengan serbuk yang lainnya sebelum ditingkatkan ikatan antar partikelnya melalui proses *sintering*. Dalam proses pembuatan komposit yang dilakukan menggunakan metode metalurgi serbuk, terjadinya ikatan antar partikel serbuk adalah akibat dari adanya *interlocking* antar permukaan dan juga difusi antar permukaan partikel. Untuk difusi, dapat terjadi pada saat bahan menjalani proses *sintering* di dalam *furnace*. Produk yang ada setelah melewati proses kompaksi disebut bakalan atau bahan kompak mentah (*green compact*), produk tersebut telah menyerupai produk akhir secara bentuk, akan tetapi kekuatannya masih rendah karena ikatan antar serbuk belum terlalu baik. Kekuatan akhir dari bahan produk diperoleh setelah selesainya proses *sinter* (Maulana, 2013).

Kemampuan dari suatu serbuk logam untuk dikompaksi dengan efektif dan menghasilkan bakalan dipengaruhi oleh karakteristik serbuk awal. Karakteristik dasar dari serbuk tersebut yang akan mempengaruhi sifat bakalan hasil kompaksi adalah sebagai berikut:

- Bentuk Partikel

Bentuk partikel merupakan karakteristik serbuk yang akan mempengaruhi ikatan antar partikel serbuk, aliran serbuk selama proses kompaksi serta kompresibilitas dari serbuk. Bentuk partikel erat kaitannya dengan luas permukaan sentuh partikel dan bentuk partikel sangat ditentukan oleh proses fabrikasi serbuk tersebut (Nurmawati, 2008). Beberapa contoh bentuk partikel serbuk ditunjukkan oleh gambar 2.1 berikut ini.



Gb. 2.1 Beberapa bentuk partikel serbuk (Kalpakjian, 2008)

- Ukuran Partikel Serbuk

Ukuran partikel serbuk akan menentukan densitas, porositas dan sifat-sifat mekanik material hasil kompaksi. Semakin kecil atau halus ukuran partikel serbuk, maka densitas produk hasil kompaksi akan semakin besar. Ada beberapa teknik yang dapat digunakan untuk mengukur ukuran partikel serbuk, yaitu dengan mikroskop, pengayakan (*sieving*) dan lain sebagainya (Nurmawati, 2008).

Menurut Nurmawati (2008) ukuran partikel dan distribusi ukuran partikel, keduanya memiliki pengaruh yang cukup signifikan dalam mampu alir dan sifat lainnya. Dimensi serbuk yang halus akan lebih mudah bereaksi bila dibandingkan dengan dimensi serbuk yang lebih besar yang dapat menurunkan mampu alir material. Selain itu, ukuran partikel serbuk yang halus mempunyai laus permukaan kontak antar partikel secara difusi saat proses sinter.

- Mampu alir

Mampu alir serbuk (*flowbility*) merupakan karakteristik yang menggambarkan sifat alir dari partikel serbuk dan kemampuan serbuk untuk memenuhi ruang cetakan. Pada umumnya, faktor-faktor yang mempengaruhi gesekan antar partikel, seperti bentuk partikel bulat dan halus akan meningkatkan mampu alir serbuk. Kemampuan alir serbuk berkaitan erat dengan sifat kohesi antar partikel sehingga partikel yang memiliki kemampuan pemadatan (*compressibility*) yang bagus akan memiliki kemampuan alir yang bagus pula (Ekawati, 2008).

- Mampu tekan

Mampu tekan (*compressibility*) serbuk merupakan perbandingan antara volume serbuk mula-mula dengan volume serbuk yang telah ditekan dan menjadi bakalan (*green compact*) yang nilainya berbeda-beda tergantung dari distribusi ukuran serbuk dan bentuk butirannya. Besarnya mampu tekan serbuk dipengaruhi oleh bentuk dan ukuran serbuk serta efek gesekan antar partikel serbuk. Serbuk yang memiliki bentuk lebih teratur dan halus akan memiliki mampu tekan dan densitas bakalan (*green density*) yang lebih tinggi dibandingkan dengan serbuk yang besar dan kasar (Ekawati, 2008).

Setelah pencampuran serbuk selesai dilakukan, serbuk yang telah dicampur ditempatkan pada cetakan dan kemudian diberi tekanan sampai pada nilai tekan tertentu sehingga serbuk mengalami konsolidasi dan memiliki bentuk yang sesuai dengan cetakannya. Kompaksi merupakan parameter yang sangat penting dalam metalurgi serbuk, kompaksi sangat mempengaruhi sifat fisis dan mekanis benda kerja. Selama kompaksi, serbuk mengalami perilaku-perilaku yang bermacam-macam (Nurmawati, 2008). Perilaku tersebut antara lain:

- Pergerakan dan penataulangan partikel

Tekanan menyebabkan pergerakan dan penataulangan partikel dengan cara mengisi ruang-ruang yang kosong antar serbuk. Pergerakan ini dibatasi oleh friksi yang terjadi antar sesama partikel ataupun yang terjadi antara dinding cetakan dengan partikel serbuk. Pergerakan tersebut terjadi selama serbuk mendapatkan tekanan. Kecepatan penekanan yang tinggi dapat menyebabkan

immobilisasi serbuk dimana serbuk tidak sempat menjangkau ruang yang kosong akibat adanya tegangan kompresi yang tinggi dan dalam waktu yang cepat. Partikel-partikel yang memiliki densitas yang rendah relatif mudah mengalami pergerakan, artinya material tersebut memiliki kompresibilitas yang tinggi.

- Deformasi elastis dan plastis

Peningkatan tekanan menyebabkan serbuk mengalami deformasi plastis dan elastis. Deformasi ini menyebabkan pengurangan jumlah pori. Ciri dari terjadinya deformasi elastis adalah adanya pembesaran dimensi dari hasil kompaksi setelah dikeluarkan dari cetakan. Deformasi plastis memegang peranan penting dalam mekanisme densifikasi selama proses kompaksi dari pada deformasi elastis. Semakin besar tekanan kompaksi yang diberikan maka akan semakin besar pula deformasi plastisnya

- Penghancuran partikel

Hancurnya partikel disebabkan oleh tegangan yang diterima serbuk lebih besar dari tegangan patah material. Material dengan daktilitas rendah, cenderung mengalami perpatahan saat kompaksi, partikel-partikel dengan porositas tinggi juga akan mengalami tahap perpatahan karena adanya perbatasan antara bagian partikel. Perpatahan umumnya menyebabkan material mengalami pemadatan yang disebabkan partikel yang patah akan cenderung mengisi ruang kosong.

Husein (2002) menjelaskan bahwa produk hasil kompaksi (bakalan) memiliki sifat fisik sebagai berikut:

- *Green densitas*

Green densitas menyatakan kerapatan partikel serbuk yang telah dikompaksi menjadi padatan (bakalan), hal tersebut berkaitan erat dengan kemampuan partikel untuk mengisi ruang kosong antar partikel, dimana akan menjadi parameter untuk mengetahui efektifitas dari proses kompaksi. Kerapatan partikel dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu:

- Sebanding dengan tekanan kompaksi.
- Distribusi partikel : distribusi yang merata dapat meningkatkan densitas.
- Berbanding terbalik dengan kecepatan penekanan, karena penekanan berkecepatan tinggi dapat menyebabkan partikel tidak sempat mengisi ruang antar partikel secara maksimal.

- Porositas

Porositas merupakan kondisi kebalikan dari densitas, yaitu ruang kosong atau pori-pori yang muncul akibat dari ketidakmampuan partikel serbuk dalam mengisi ruang antar partikel ketika dilakukan kompaksi. Bakalan yang memiliki porositas, ketika dilakukan proses sinter, akan mengalami penurunan porositas akibat terjadinya difusi antar partikel. Porositas terjadi karena beberapa hal, antara lain: terjebaknya gas di dalam produk kompaksi, kecepatan penekanan yang tinggi dan distribusi ukuran partikel yang tidak merata.

Selain sifat fisik bakalan, Huesin (2002) juga menjelaskan sifat mekanik produk hasil kompaksi yang mana kekuatan produk kompaksi (*green strength*) dihasilkan

dari ikatan permukaan antar partikel hasil dari pembebanan yang diberikan, dimana hal tersebut akan menyebabkan permukaan partikel terdeformasi plastis. Sifat mekanik dari benda kerja, seperti kekerasan dan kuat tekan terutama dipengaruhi oleh adanya mekanisme *mechanical interlocking* antar muka partikel serbuk. Deformasi plastis mengakibatkan kontak area antar muka makin besar. Peningkatan tekanan kompaksi sampai batas tertentu akan meningkatkan kekuatan mekanis melalui mekanisme pengaturan, penyusutan, deformasi dan perpatahan serbuk.

2.3.3 Sintering

Proses sinter (*sintering*) merupakan proses pemanasan yang dilakukan pada temperatur tertentu dan selama waktu tertentu untuk membentuk ikatan yang lebih kuat antar partikel serbuk agar dihasilkan struktur koheren yang kompak dan kuat. Pemanasan ini secara umum dilakukan pada temperatur di bawah titik leleh unsur utamanya (Maulana, 2013)

Budihartono (2012) mengatakan bahwa selama proses sinter terbentuklah batas-batas butiran yang merupakan tahap permulaan dari rekristalisasi. Ikatan yang terjadi dalam proses *sintering* akan meningkatkan kepadatannya (*density*) serta sifat mekanis produk akhir seperti kekerasan dan kekuatannya. Proses sinter dilakukan di dalam ruang yang tertutup untuk mencegah pengaruh dari suasana lingkungan di sekeliling ruang yang dapat bereaksi dengan bakalan.

Proses sinter dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya adalah :

- **Temperatur sinter**

Menurut Kurniawan (2006) proses perpindahan massa dipengaruhi oleh temperatur sinter. Dengan meningkatnya temperatur sinter, maka ikatan yang terbentuk antar partikel serbuk juga akan semakin cepat dan menyebabkan sifat mekanis seperti kekuatan, kekerasan dan sifat lainnya dari bakalan yang telah di sinter akan meningkat pula. Namun, peningkatan temperatur juga menimbulkan kerugian seperti terjadinya penyusutan ukuran partikel (*shrinkage*), yang mengakibatkan terjadinya perubahan dimensi produk serta menurunnya keakuratan dimensinya.

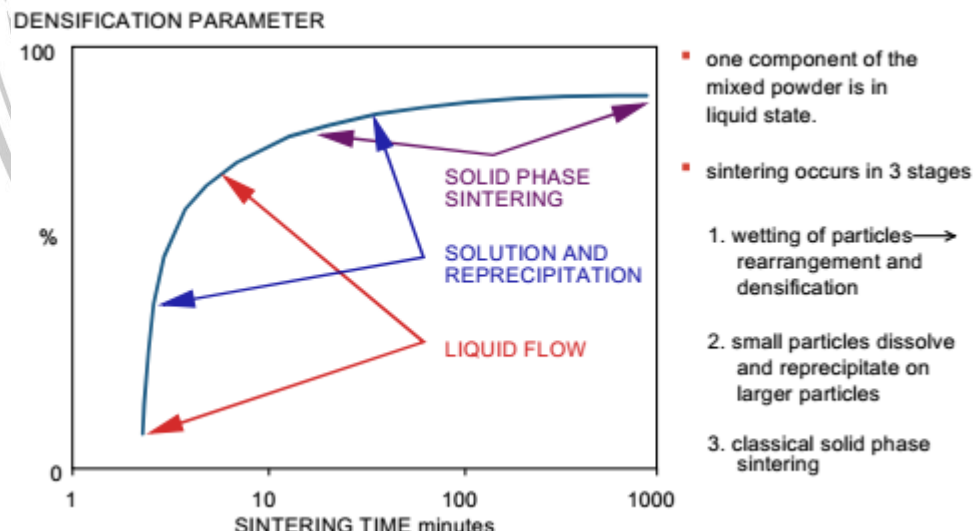
Temperatur sinter yang digunakan haruslah sesuai agar nantinya memberikan hasil produk yang baik setelah proses sinter selesai, hal tersebut dikarenakan temperatur sinter sangat berpengaruh terhadap proses homogenisasi dan pertumbuhan butir yang akhirnya akan menentukan perubahan dimensi yang terjadi selama pemanasan berlangsung (Kurniawan, 2008).

Kalpajian (2008) menjelaskan bahwa material komposit matriks logam (MMC), temperatur sinter yang digunakan adalah temperatur sinter dari matriks komposit tersebut, yaitu sekitar 70-90% dari temperatur lelehnya. Untuk material Aluminium 1050 yang memiliki titik leleh sekitar 650°C, maka temperature sinternya adalah berkisar antara 455°C sampai 585°C.

- **Waktu Tahan Sinter**

Peningkatan waktu tahan sinter (*holding time*) memberi pengaruh pada sifat mekanis produk yang hampir sama dengan kenaikan temperature sinter, karena waktu sinter dan temperature sinter akan saling mempengaruhi dalam proses difusi partikel serbuk. Namun, kerugian waktu tahan sinter yang terlalu lama akan menyebabkan terjadinya persen penyusutan yang akan mengurangi keakuratan dimensi produk dan juga dapat menimbulkan pembengkakan biaya dalam pemrosesan (Nurmawati, 2008)

Verlinden dan Froyen (1994) menyebutkan bahwa waktu tahan sinter yang dapat digunakan untuk material aluminium adalah sekitar 30 – 100 menit. Dapat dilihat pada gambar 2.2 tentang hubungan waktu tahan sinter dan densifikasi untuk material aluminium, dapat diketahui bahwa waktu tahan sinter yang ideal adalah pada waktu antara 30 – 100 menit, karena untuk waktu tahan sinter diatas 100 menit, densifikasi atau pemadatannya tidak meningkat secara signifikan.



Gb. 2.2 Waktu tahan sinter material aluminium (Verlinden, 1994)

- **Atmosfir Sinter**

Pengaruh atmosfir sinter dalam proses pemanasan bakalan (*green compact*) adalah untuk memberikan kontrol pada reaksi-reaksi kimia yang akan terjadi anatar bakalan dengan lingkungan sekitarnya selama proses sinter. Gas-gas di lingkungan yang tidak diinginkan, tidak hanya bereaksi pada bagian permukaan luar bakalan saja, namun juga mampu masuk melalui pori-pori dan bereaksi dengan bagian dalam bakalan. Ada bermacam-macam jenis gas yang digunakan dalam penggunaan atmosfir sinter, tergantung kebutuhan dan jenis bahan yang diproses. Terkadang, *sintering* juga dilakukan dengan kondisi atmosfir vakum, hal ini dikarenakan pada kondisi tersebut prosesnya relatif lebih bersih dan lebih mudah dalam mengontrol atmosfernya (Nurmawati, 2008).

Tahapan proses sinter

Pada proses sinter, menurut German (1994), terdapat beberapa tahapan yang dialami oleh partikel-partikel serbuk, yaitu:

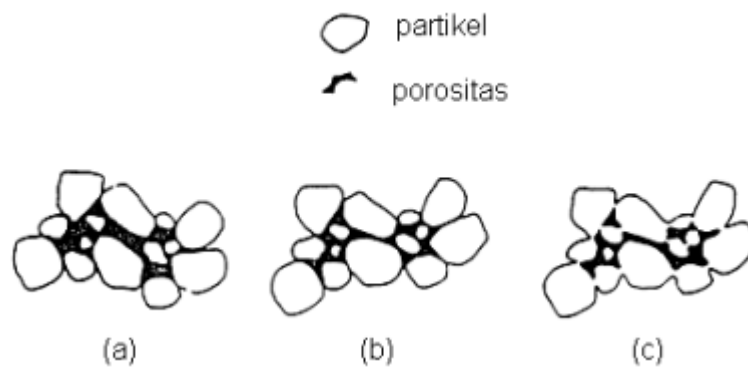
1. *Point Contact* (ikatan awal antarpartikel)

Pada tahap ini, partikel-partikel serbuk yang telah menjadi kompak membentuk titik kontak antarpartikel yang satu dengan partikel lainnya yang bersebelahan pada orientasi acak. Kekuatan ikatan kontak antar partikel yang terbentuk masih lemah karena ikatan kontak yang terbentuk masih dalam bentuk titik-titik kecil dan pada tahap ini juga belum terjadi perubahan dimensi pada bakalan (*green compact*). Semakin banyak bidang kontak antar partikel yang terjadi,

maka semakin banyak pula ikatan-ikatan antar partikel tersebut yang terjadi yang nantinya akan semakin membesar pada tahap sinter berikutnya. Sehingga, nantinya akan menyebabkan densitas dan sifat mekanik produk setelah proses sinter terjadi.

2. Tahap Awal (*Initial Stage*)

Secara umum tahap awal ditandai dengan penyusunan kembali leher, yang meliputi penyusunan kembali formasi partikel setelah mengalami pergerakan untuk meningkatkan jumlah titik kontak dan pada akhirnya membentuk ikatan pada titik kontak tersebut. Tahapan awal dalam proses *sinter* seperti ditunjukkan oleh gambar 2.3 berikut ini.

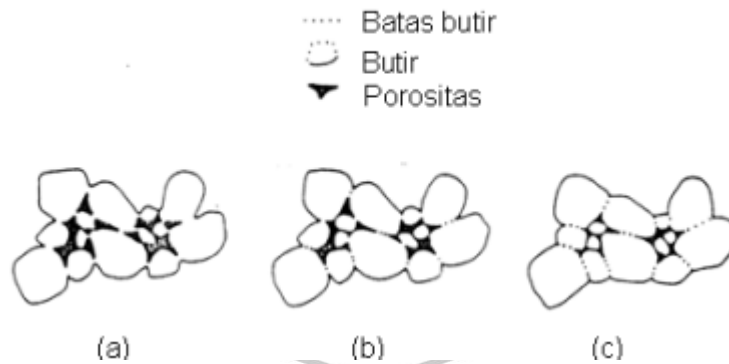


Gb. 2.3 Tahap pertama proses sintering: a) Partikel awal, b) Penyusunan kembali, c) Terbentuknya formasi leher (German, 1994)

3. Tahap Kedua (*Intermediate Stage*)

Pada tahap ini, titik kontak antar partikel tumbuh dan menjadi leher (*neck*). Pertumbuhan leher akan berlanjut terus dan diikuti dengan pertumbuhan butir. Pada tahap ini, mulai terjadi penyusutan dimensi secara perlahan akibat adanya pertumbuhan leher antar partikel yang semakin meningkat yang juga menyebabkan

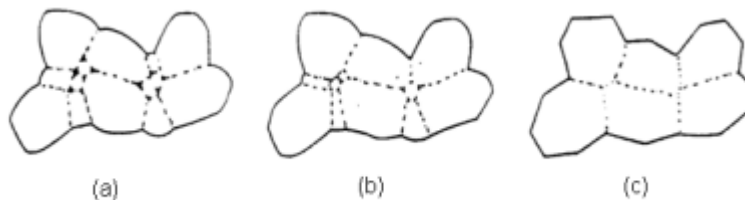
porositasnya semakin berkurang atau mengecil, pusat partikel bergerak semakin dekat secara bersama-sama. Penyusutan dimensi yang terjadi setara dengan jumlah porositas yang berkurang. Perubahan fisik selama tahap kedua adalah sebagai berikut: pertumbuhan ukuran leher antar partikel, porositas menurun atau berkurang, pusat partikel bergerak semakin dekat secara bersama-sama, penyusutan setara dengan jumlah berkurangnya porositas terbentuknya saluran yang saling berhuungan (*continuous channel*) dan berakhir ketika porositas terisolasi. Penyusutan secara maksimal terjadi pada tahap kedua. Tahapan kedua proses sinter ditunjukkan oleh gambar 2.4 di bawah ini.



Gb. 2.4 Tahap kedua proses sintering: a) Pertumbuhan leher dan volume penyusutan, b) Perpanjangan dari batas butir, c) Pertumbuhan butir berlanjut dan batas butir meluas, volume penyusutan dan pertumbuhan butir (German, 1994)

4. Tahap Ketiga (*Final Stage*)

Pada tahap ini, proses berjalan lambat. Pori-pori yang bulat menyusut dengan adanya mekanisme difusi. Setelah batas butir meluncur, pori akan berdifusi ke batas butir hingga mengalami penyusutan, dimana proses ini berlangsung lambat. Dengan pemanasan yang lama, akan menyebabkan berkurangnya jumlah pori. Tahapan ketiga proses sinter ditunjukkan oleh gambar 2.5 berikut ini.



Gb. 2.5 Tahapan ketiga proses sintering: a) Pertumbuhan leher dengan discontinues pore-phase, b) pertumbuhan butir dengan pengurangan porosita, c) Pertumbuhan butir (German, 1994)

Solid State Sintering

Solid state sintering merupakan jenis proses sinter dimana proses pemanasan (sinter) yang dilakukan hanya melibatkan fasa padat dan tidak terjadi pencairan dari partikel (tidak melibatkan fasa cair). Dalam proses sinter ini menentukan jumlah massa yang mengalir. Mekanisme perpindahan massa ini terdiri dari dua tahap, yaitu :

- Perpindahan permukaan (*surface transport*)

Pada tahap ini akan menghasilkan pertumbuhan leher tanpa adanya perubahan jarak partikel (tidak adanya penyusutan atau densifikasi) karena massa mengalir dan

berakhir pada permukaan partikel. Difusi permukaan merupakan kontribusi yang sangat penting selama proses perpindahan permukaan pada waktu sinter.

- Perpindahan bulk (*bulk transport*)

Dalam tahap ini melibatkan difusi volume, difusi batas butir, aliran plastis dan aliran rekat. Aliran plastis umumnya penting selama waktu pemanasan, terutama pada serbuk yang telah dikompaks, dimana berat jenis diskolasi awal tinggi. Lain halnya dengan material amorf seperti polimer dan gelas, yang dipanasi dengan aliran rekat, dimana partikel-partikel saling Bersatu pada kecepatan tertentu dan sangat tergantung pada ukuran partikel dan sifat meerkat material. Permbentukan aliran rekat juga dapat terjadi untuk logam dengan fasa cair pada batas butir. Difusi batas butir penting untuk densifikasi material kristalin. Pada umumnya, proses perpindahan bulk lebih aktif terjadi pada temperatur tinggi.

2.4 Aluminium

Aluminium merupakan unsur kimia golongan III A dalam system periodik unsur, dengan nomor atom 13 dan berat atom 26,98 gram/mol. Aluminium merupakan logam dengan densitas rendah, yaitu berkiran $2,7 \text{ g/m}^3$. Sebagai logam, aluminium juga memiliki titik lebur yang rendah, yaitu sekitar 660°C . Aluminium juga tidak berpijar ketika melebur, berbeda dengan baja yang berpijar menjadi merah ketika melebur. Aluminium murni memiliki warna fisik putih keabu-abuan. Struktur kristal aluminium adalah FCC, sehingga aluminium tetap ulet meskipun pada temperature yang sangat rendah. Sifat ulet tersebut menyebabkan aluminium memiliki sifat mampu bentuk yang baik. Aluminium juga memiliki ketahanan korosi

yang baik. Sifat tahan korosi tersebut diperoleh dari terbentuknya lapisan oksida aluminium yang kuat, rapat, dan stabil yang melekat pada permukaan aluminium tersebut, sehingga melindungi bagian dalamnya. Namun, lapisan oksida aluminium tersebut selain memiliki manfaat untuk menahan korosi juga memiliki dampak negatif, yaitu membuat aluminium sulit untuk di las dan juga di solder. Selain itu, aluminium juga memiliki kekurangan yaitu pada tingkat kekuatan dan kekerasannya yang rendah.

Menurut Setyaji tahun 2012, aluminium dapat dipadukan dengan unsur lain untuk memperbaiki sifat-sifat dari aluminium yang kurang baik tersebut. Secara garis besar, paduan aluminium dibedakan menjadi 2 jenis, yaitu paduan aluminium cor dan paduan aluminium tempa (Setyaji, 2012). Paduan aluminium juga dikelompokkan berdasarkan unsur paduannya, yang dapat dilihat pada tabel 2.1 berikut ini.

Tabel 2.1 Pengelompokan Aluminium berdasarkan unsur paduannya

<i>Designation</i>	<i>Wrought</i>	<i>Cast</i>
<i>Aluminium, 99.00% minimum and greater</i>	1xxx	1xx.x
<i>Aluminium alloy grouped by major alloying elements:</i>		
<i>Copper</i>	2xxx	2xx.x
<i>Manganese</i>	3xxx	-
<i>Silicon, with added copper and/or magnesium</i>	-	3xx.x
<i>Silicon</i>	4xxx	4xx.x
<i>Magnesium</i>	5xxx	5xx.x
<i>Magnesium and silicon</i>	6xxx	-
<i>Zinc</i>	7xxx	7xx.x
<i>Tin</i>	-	8xx.x
<i>Other element</i>	8xxx	9xx.x
<i>Unused series</i>	9xxx	6xx.x

Pada penelitian ini, bahan yang akan digunakan adalah Aluminium 1050 yang telah berbentuk serbuk. Sesuai klasifikasi yang telah disebutkan diatas. Al 1050 merupakan jenis aluminium murni dengan kandungan minimal aluminium 99,0% baik dalam menahan korosi. Karakteristik aluminium 1050 ditunjukkan pada tabel 2.2 berikut ini :

Tabel 2.2 Karakteristik Aluminium 1050

Property	Value
Density	2.71 g/cm ³
Melting Point	650°C
Modulus of Elasticity	71 GPa
Electrical Resistivity	0.0282x10 ⁻⁶ Ω.m
Thermal Conductivity	222 W/m.K
Thermal Expansion	24x10 ⁻⁶ /K
Tensile Strength	105 – 145 MPa
Hardness Brinell	34 HB

Sumber: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2798>

2.5 Titanium

Titanium merupakan unsur logam dalam kelompok IV B Susunan Berkala Unsur dengan nomor atom 22, yaitu berlambang Ti. Titanium memiliki berat atom 47,90. Titanium murni merupakan logam berwarna putih keperakan yang sangat mengkilap. Salah satu karakteristik titanium yang paling terkenal adalah memiliki sifat yang sama kuat dengan baja tetapi beratnya hanya 60% dari berat baja. Titanium memiliki ketahanan korosi yang sangat baik bahkan lebih baik dari aluminium. Selain itu, titanium juga mampu mempertahankan kekuatannya pada suhu tinggi.

Hampir semua material titanium digunakan sebagai paduan dengan logam lain. Diantara paduan logam yang paling sering digunakan adalah aluminium, vanadium, molibdenum, mangan, besi, timah, kromonium dan zirkonium. Salah satu yang paling sering digunakan adalah Ti-6Al-4V yang memiliki komposisi kimia 90% titanium, 6% aluminium dan 4% vanadium. Karakteristik dari Ti-6Al-4V juga ditentukan pada tabel 2.3 di bawah ini:

Tabel 2.3 Karakteristik Ti-6Al-4V

Property	Value
Density	4.42 g/cm ³
Melting Range	1649 °C
Specific Heat	560 J/kg.°C
Electrical Resistivity	170 ohm.cm
Thermal Conductivity	7.2 W/m.K
Tensile Strength	1000 MPa
Hardness Rockwell C	36

Sumber: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1547>

Industri kedirgantaraan adalah pengguna dari paduan titanium. Pada titanium tersebut banyak digunakan pada bagian rangka pesawat, di berbagai bagian mesin, roda pendaratan dan tubing hidrolik serta bagian vital lainnya.

2.6 Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikri atau metalografi bertujuan untuk mengetahui bentuk, susunan dan ukuran butir dari partikel penyusun pada permukaan benda uji. Pengamatan tersebut dilakukan dengan menggunakan metode *Scanning Electron Microscope* (SEM) yang merupakan suatu tiper mikroskop electron yang

menggambarkan permukaan sampel melalui proses *scan* dengan menggunakan pancaran energi yang tinggi dari electron dalam suatu pola *scan raster*. Elektron berinteraksi dengan atom-atom yang membuat sampel menghasilkan sinyal yang memberi informasi mengenai permukaan topografi sampel.

2.7 Pengujian Densitas

Setyaji (2012) menjelaskan bahwa densitas atau kerapatan merupakan besaran fisis yang menggambarkan perbandingan antara massa sampel (m) dengan volume sampel (V). Pengukuran densitas aktual sampel yang berupa padatan dapat menggunakan prinsip Archimedes agar didapat nilai yang lebih teliti. Densitas teoritis dihitung berdasarkan rule of mixture (ROM). Untuk menghitung nilai densitas aktual dan teoritis digunakan persamaan berikut:

$$\rho_m = \frac{m_u}{(m_u - m_a)} \times \rho_{H_2O}$$

$$\rho_{th} = \rho_{Al} \cdot V_{Al} + \rho_{Ti} \cdot V_{Ti}$$

Dimana:

ρ_m : densitas aktual (gram/cm³)

m_u : massa sampel kering (gram)

m_a : massa sampel di dalam air (gram)

ρ_{H_2O} : massa jenis air = 996,59 kg/m³

ρ_{th} : densitas teoritis (gram/cm³)

ρ_{Al} : densitas Al (gram/cm³)

ρ_{Ti} : densitas Ti (gram/cm³)

VAI : fraksi massa Al (%)

VTi : fraksi massa Ti (%)

2.8 Pengujian Porositas

Setyaji (2012) mendefinisikan porositas sebagai perbandingan antara jumlah volume ruang kosong (rongga pori) yang dimiliki oleh zat padat terhadap jumlah dari volume zat padat itu sendiri. Porositas suatu bahan pada umumnya dinyatakan sebagai porositas terbuka atau apparent porosity, dan nilainya dapat dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$\text{Porositas} = \left(1 - \frac{\rho_m}{\rho_{th}} \right) \times 100 \%$$

Dimana:

ρ_m : densitas aktual (gram/cm³)

ρ_{th} : densitas teoritis (gram/cm³)

Selain dengan persamaan di atas, porositas dapat dihitung dengan metode *planimetri*. *Planimetri* adalah ilmu ukur (tentang gambar bangun dua dimensi yang semua titiknya terletak dalam suatu bidang datar). dalam metode ini menggunakan milimeterblok untuk dapat menghitung jumlah porositas dari hasil foto mikro.

Dengan diketahuinya nilai densitas teoritis dan densitas aktual dari sampel yang diujikan, maka nilai porositas sampel juga dapat ditentukan dengan persamaan di atas.